

[招待講演] 音響管を用いた音響学・音声科学の教育

荒井隆行

上智大学理工学部 〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1

E-mail: arai@sophia.ac.jp

あらまし 人間の声道を模した音響管を用いて、音響学ならびに音声科学の基礎に触れる。声道模型を用いることで通常は見えない声道が可視化されるのみならず、音声科学の基礎となる様々な側面、例えば音源フィルタ理論や、声道形状と母音の質の関係を直感的に理解することが可能となる。またスライド式3音響管では、その単純な構造から子どもを対象にした科学教室等にて工作を体験することができる。さらに、母音の低次フォルマント周波数の近似値を簡単に推定することが可能であり、実測値と比較することで理論を理解する助けにもなる。実際に大学の講義でこのような音響管による声道模型を用いた結果、その教育的な効果が確認された。

キーワード 音響教育、音響管、声道模型、音声科学、母音生成

[Invited Talk] Education in acoustics and speech science using acoustic tubes

Takayuki ARAI

Faculty of Science and Technology, Sophia University 7-1 Kioi-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8554 Japan

E-mail: arai@sophia.ac.jp

Abstract Basic elements of acoustics and speech science are described using acoustic tubes that simulate human vocal tracts. The vocal-tract models not only make visible the usually unseen vocal tract, but they also enable us to intuitively understand various aspects of speech science. For example, the source-filter theory and the relationship between vocal-tract shape and vowel quality are two concepts easily illustrated by the models. Additionally, the simple shape of the sliding three-tube model makes it suitable for a children's handicraft for a science workshop. Also, the simple structure of the three-tube model helps students to understand theory because we can easily estimate the approximation values of the lower formants and compare these values to measured formant frequencies. We used the acoustic tubes as vocal-tract models in lectures at the undergraduate level and confirmed that they are useful educational tools.

Keyword education in acoustics, acoustic tube, vocal-tract model, speech science, vowel production

1. はじめに

声道模型の歴史は古く、18世紀には Kratzenstein や von Kempelen などが物理模型を用いて音声生成を行っていたことは知られている [1-4]。Willis は、断面積が一樣で長さを変えられるような円筒管を声道と見立てて、母音を連続的に生成することを試みている [3,5]。20世紀になると、Chiba and Kajiyama が声道形状の3次元的計測を行い、その測定結果を単純化した形状を持つ物理模型を使って母音の生成に成功している [6]。そこでは、物理模型から発せられる母音が人間が発する母音をよく近似していることを確認し、声道形状が母音の質に大きく寄与していることを示している。Arai は Chiba and Kajiyama [6] による声道模型を復元し [7]、さらに音響教育の目的による教材として

の効果を実証している [8]。特に、音声科学の基礎となる音源フィルタ理論や、声道形状と母音の質の関係をなどを確認するのに有効である。本稿では、その声道模型のいくつかを紹介すると同時に、音響学・音声科学の教育について述べる。

2. 声道模型

2.1. 声道形状が固定の模型

Chiba and Kajiyama [6] に基づく復元模型 [7] を、図 1 に示す。図 1 の 1 本 1 本が、日本語 5 母音に対応している。この模型の形状はその断面が常に円であり、声道の長さ方向に沿ってその直径は折れ線（一次近似）で表わされる [7]。一方、図 2 は図 1 の形状をさらに簡素化し、声道の長さ方向の直径が 0 次近似されたもの

になっている[9]. すなわち、図2の模型は短い円筒管を複数、接続することで実現される. その際、接続する円筒管を短くすると同時に数を多くすれば、図1の1次近似の形状に次第に近づくのは明らかである. しかし、逆に接続する円筒管の数をどこまで少なくできるか、という課題を図2の模型では追求した. その結果、この模型はほぼ図1の模型と同程度の母音の質を保ったまま形状が簡素化されている. 図3と図4は、図2の模型における長さ方向の断面積変化(断面積関数)をほとんど変えずに、部分的に(図3)、あるいは全てにおいて(図4)、その断面を円から正方形に変えたものである. これらの模型では、母音の質は図2のものと同様であり、断面の形状よりも断面積関数が重要であることがこれらの比較からも分かる.

2.2. スライド式3音響管

図5に示すスライド式3音響管モデル[10](以下、S3Tモデル)は、Fant[11]による3音響管モデルに基づいている. このS3Tモデルは、Willisの模型[3,5]と同様、断面積が一樣な円筒管を用いるが、Willisの模型とは異なり、その中にスライド可能な短く直径の小さい円筒管(以下、スライド部)が挿入されている. スライド部は母音生成時における声道内の狭窄を模擬しており、その位置が変化することにより様々な母音が生成される.

その形状が単純であるため、3音響管に対して容易に共鳴周波数を近似することが可能である[12]. このモデルの寸法を、図5(b)のように各部の長さや断面積で表わすことにする. すると、前腔に対する第1共鳴周波数、後腔に対する第1共鳴周波数、そして後腔

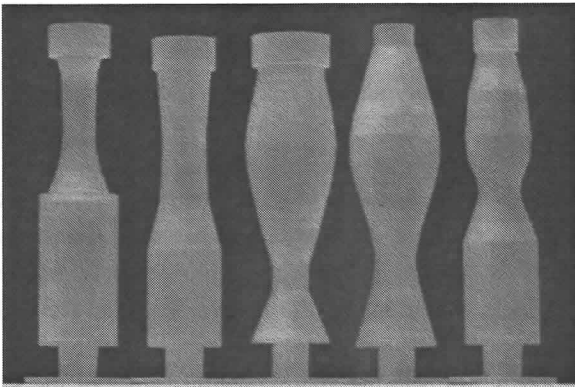


図1 Chiba and Kajiyama [6]に基づく声道模型[7]. 左から /i/, /e/, /a/, /o/, /u/.

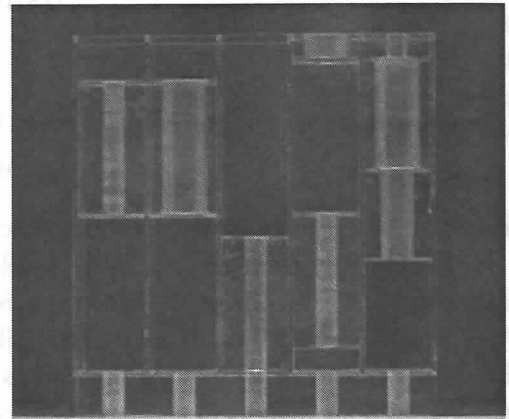


図3 円筒管接続による声道模型(図2)を一体化した声道模型. 断面積が最大になる部分のみ、断面が円ではなく正方形. 左から /i/, /e/, /a/, /o/, /u/.

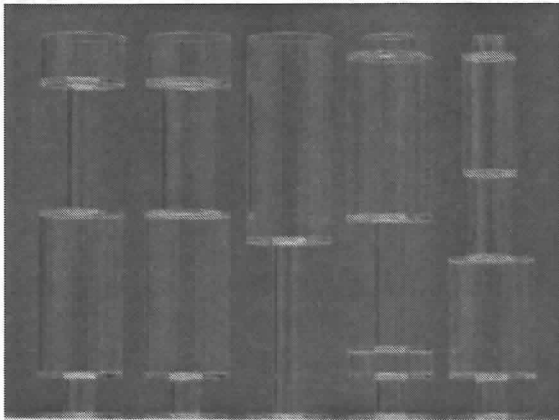


図2 円筒管接続による声道模型[9]. 左から /i/, /e/, /a/, /o/, /u/.

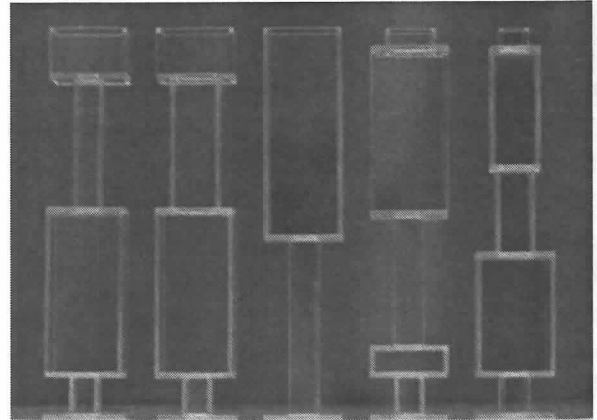


図4 角型の管を接続することによる声道模型. 左から /i/, /e/, /a/, /o/, /u/.

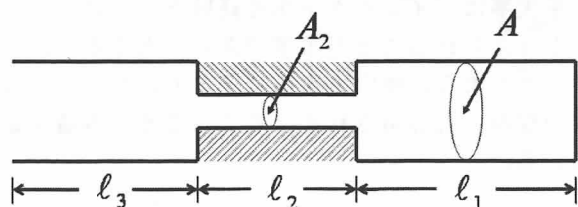


図5 スライド式3音響管モデル[10].

と狭窄部が作るヘルムホルツ共鳴器に対する共鳴周波数はそれぞれ、以下ようになる[12]:

$$\frac{c}{4l_3}, \frac{c}{2l_1}, \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A_2}{Al_1l_2}}$$

ここで c は音速である。実際に、実測されたフォルマント周波数と上記の共鳴周波数はよく一致する[10].

3. 声道模型を用いた教育

3.1. 子どもを対象とした科学教室

S3T モデルはその構造が単純であるため、子どもが自分で比較的容易に工作することが可能である。その結果、子どもを対象とした科学教室でも威力を発揮する。我々は国立科学博物館において、「音の科学教室一音のふしぎ・声をつくろう」を2006年～2009年、毎年秋に開催してきた。毎回、小学校高学年を主な対象として日本音響学会との共催で行われ、運営に当たっては日本音響学会音響教育調査研究委員会有志の協力を得ている。

S3T モデルの工作では、音質を担保しながらなるべく身近な材料で手軽に作れるように意識した。狭めが移動する様子が分かりやすいよう、外側の一様音響管には長さ20 cm、外径4 cmの透明のアクリルの筒を使用した。音源のリードは、細い竹筒の断面にプラスチックシートを乗せて適切に励振するように固定し、音響管（アクリル筒）にぴったりと装着できるようフィルム空き容器やOリングと組み合わせた。スライド部にもフィルム容器を利用し、針金を付けて操作しやすくしている。

本科学教室は、毎回のアンケート結果より、それなりに参加者に満足していただいたと自負している。活動のメインは、前述の簡単な材料で声の出る模型を作る工作や様々な模型や教材を駆使したデモンストレーションであるが、それらを通してその仕組みや背景にある理論なども知らず知らずに体感することができる

からであろう。さらに、S3T モデルで使用する音響管とスライド部を用い、リード式音源の代わりにエアリード用のマウスピースを接続してスライドホイッスルにする工作も本科学教室では行うが、なぜ音源部が違うだけで楽器になったり声になったりするのかわ、その「不思議さ」を実感してもらうことも大事だと考える（詳細なる議論は、文献[13,14]を参照されたい）。

3.2. 高等教育における声道模型の利用

大学の講義の場合、音声学の基礎となる音源フィルタ理論や、声道形状と母音の関係などを確認するのに声道模型は大変有用である。そして、音声学を学ぶ理系学生のみならず、音声学や音声学・聴覚科学を学ぶ文系学生や言語聴覚士を志す学生などに対しても、難解な数式や理論を多用せずに直感的に原理を示すのに有効である。また、円筒管接続式声道模型とS3Tモデルはその主要部分の形状が一致することから、それらを組み合わせることによってさらなる効果が期待される。そこで、その両模型を実際の大学の講義で用いた例を以下に紹介する。

アメリカ Rutgers 大学の言語学科における上級クラスの Phonetics の講義にて、円筒管接続式とS3Tモデルの声道模型を用いた講義を2回に渡って行っていただいた。受講者は20-25名である。1回目は講義が始まって間もない導入の時期に行われた調音に関する講義の中で、30分程度の説明を行った。S3Tモデルを用いて、まず狭窄がない一様音響管による「あいまい母音」を示し、次に狭窄となるスライド部を音響管に挿入しスライドさせながら前舌母音と後舌母音の違いを体感してもらった。その後、円筒管接続式声道模型の /i/ と /e/ のペアを用いて母音における舌の高低について説明し、最後に /u/ と /o/ の模型を用いて口唇の丸めについて説明を行った。

1回目の講義の後、受講者の中で回答に協力してくれた10名から得られた感想をまとめた結果、以下のようになった。なお、回答は自由記述とし、括弧の中は同様の感想が得られた人数を示す。

The models were interesting, helpful and useful for speech education (10)

The models helped me understand the relationship between vocal tract shape and vowel quality (3)

The models enabled one to visualize sound and gain a better understanding of speech production (6)

The models produced realistic (human-like) vowels that could easily be differentiated (5)

The models helped me to visualize the location of constrictions in the vocal tract (1)

The demonstration helped me understand what the

glottal source sound is like (1)

2回目は中盤から後半にかけて行われた Acoustics に関する講義の中で、90分の授業を2コマ分費やして行われた。1コマ目では、まず片側が閉じて片側が開いたような音響管の共鳴について、その共鳴周波数を理論から計算すると同時に、実際に一様音響管から生成されたあいまい母音を録音し、スペクトル分析することで共鳴周波数を測定し理論値と比較した。その後、2音響管モデルに対する理論から共鳴周波数を計算すると同時に、/a/の模型から生成される音を録音し、スペクトル分析することで得られる共鳴周波数と比較した。2コマ目では、3音響管モデルに対する理論から同様に共鳴周波数を計算すると同時に、模型から生成される音に対してスペクトル分析を行い、そこから得られる共鳴周波数と比較した。

2回目の講義の後、受講者の中で回答に協力してくれた9名から得られた感想をまとめた結果、以下のようになった。

The acoustic models were interesting, helpful and/or useful (9)

Whereas the vocal tract is usually invisible, these models make it visible (4)

The models provided a 3D visual, which is more effective than a picture (1)

The models illustrated how the shape of the vocal tract affects the output (3)

The models helped me understand how sound is produced in the vocal tract (2)

The models produced realistic sounds, with measurable formants which were almost identical to the vowels they represent (1)

The models helped me visualize the size of the Helmholtz resonator and see how resonance is effected by the size of the connecting tube (1)

The models are enjoyable because they activate the senses and they turn an abstract idea into a more solid one (1)

It was helpful to record the sounds with the Praat software and then match the measurements up to the equations we had just solved (3)

4. おわりに

このように、音響管を用いることによって音響学・音声科学に関して、その理論や原理が直感的に理解しやすくなる。さらに高等教育の場合、現象を裏付ける理論を学び、そして単純な理論式を用いて理論値と測定値の比較ができるなど、その利用方法も広がる。一方、子どもを対象とした場合、声道模型を用いること

で現象を目の当たりにし、「こうするとこうなる」ということを直感的に体感することができる。その際、仮に理論が分からないとしてもそれをその場で解決する必要はなく、「なんで？」という「ドキドキ」「ワクワク」を大事に、インパクトある経験とともに「科学の芽」を与えられることが重要であると考えられる。同じ模型が、このように使い次第で子どもに対しても高等教育の現場でも応用される。そこにこそ、本質が隠されている。

5. 謝辞

本研究の一部は日本学術振興会の科学研究費補助金(21500841)、文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業上智大学オープンリサーチセンター「人間情報科学研究プロジェクト」からの支援を受けて行われた。Rutgers 大学にて講義においてご協力いただきました川原繁人先生に心より感謝申し上げます。

文 献

- [1] W. von Kempelen, *Mechanismus der menschlichen Sprache und Beschreibung einer sprechenden Maschine*, Wien, 1791.
- [2] H. Dudley and T. H. Tarnoczy, "The speaking machine of Wolfgang von Kempelen," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.22, pp.151-166, 1950.
- [3] J. L. Flanagan, *Speech Analysis, Synthesis and Perception*, Springer-Verlag, 1965.
- [4] B. Gold and N. Morgan, *Speech and Audio Signal Processing*, John Wiley & Sons, 2000.
- [5] R. Willis, "On vowel sounds, and on reed organ pipes," *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* III, pp.231-276, 1830.
- [6] T. Chiba and M. Kajiyama, *The Vowel, Its Nature and Structure*, Tokyo-Kaiseikan, 1942.
- [7] T. Arai, "The replication of Chiba and Kajiyama's mechanical models of the human vocal cavity," *J. Phonetic Soc. Jpn.*, vol.5, no.2, pp.31-38, 2001.
- [8] T. Arai, "Education system in acoustics of speech production using physical models of the human vocal tract," *Acoust. Sci. Tech.*, vol.28, no.3, pp.190-201, 2007.
- [9] T. Arai, "Simple physical models of the vocal tract for education in speech science," *Proc. of Interspeech*, pp.756-759, Brighton, 2009.
- [10] T. Arai, "Sliding three-tube model as a simple educational tool for vowel production," *Acoust. Sci. Tech.*, vol.27, no.6, pp.384-388, 2006.
- [11] G. Fant, *Theory of Speech Production*, Mouton, The Hague, Netherlands, 1960.
- [12] K. N. Stevens, *Acoustic Phonetics*, MIT Press, Cambridge, MA, 1998.
- [13] 荒井隆行, "小中学生に対する音響教育," *日本音響学会誌*, vol.64, no.1, pp.29-34, 2008.
- [14] T. Arai, "Science workshop with sliding vocal-tract model," *Proc. of Interspeech*, pp.2827-2830, Brisbane, 2008.